



Frédéric Elie on
ResearchGate

Hygrométrie

Frédéric Elie

septembre 2000, août 2008

CopyrightFrance.com

La reproduction des articles, images ou graphiques de ce site, pour usage collectif, y compris dans le cadre des études scolaires et supérieures, est INTERDITE. Seuls sont autorisés les extraits, pour exemple ou illustration, à la seule condition de mentionner clairement l'auteur et la référence de l'article.

« Si vous ne dites rien à votre brouillon, votre brouillon ne vous dira rien ! »
Jacques Breuneval, mathématicien, professeur à l'université Aix-Marseille I, 1980

Abstract : Après avoir défini la notion d'humidité relative, on présente dans cet article le principe de sa mesure par la méthode de condensation (principe du psychromètre).

SOMMAIRE

- 1 - But de la mesure
- 2 - Principe de la mesure et résultats attendus
 - 2-1 – Théorie
 - 2-2 - Approximation de la loi de la pression de vapeur saturante pour $0 < T < 40^{\circ}\text{C}$
- 3 - Dispositif et mise en œuvre
 - 3-1 - Mode opératoire
 - 3-2 - Exemple de mesure
- 4 - Faites le calcul vous-même
- 5 - La pomme de pin indique aussi l'humidité!...

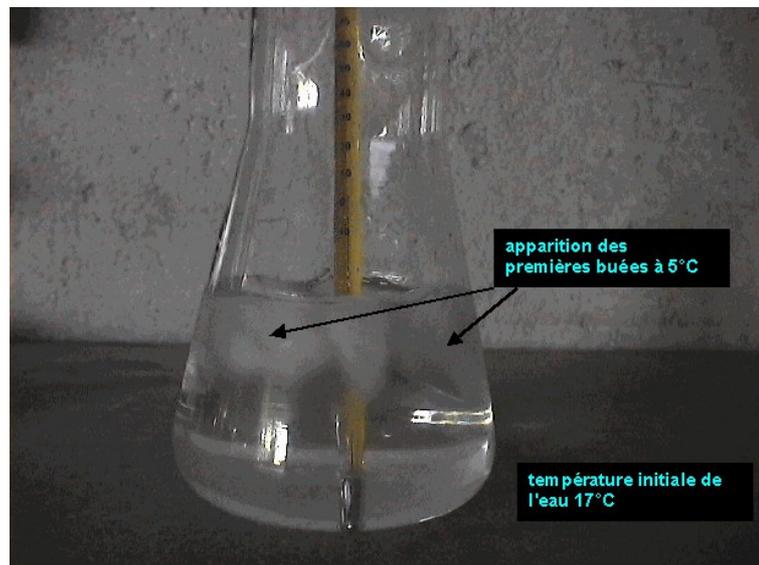
1 - But de la mesure

L'humidité de l'air est liée à la proportion d'eau sous forme vapeur dans le mélange gazeux air-eau. Si elle était seule, à la pression atmosphérique, la vapeur d'eau se condenserait à la température de 100°C . Mais comme la vapeur d'eau est mélangée à l'air, elle possède une pression partielle bien inférieure à 1 atm, et la température à laquelle elle se condense est donc plus petite que la température de condensation (ou d'ébullition) normale 100°C . Réciproquement, pour une température ambiante donnée, la vapeur d'eau se condensera si sa pression augmente suffisamment pour devenir égale à la pression de vapeur saturante qui dépend seulement de cette température. Ou encore, si la pression partielle de vapeur d'eau reste inchangée, la condensation a lieu lorsque la température descend suffisamment pour atteindre la température du point de rosée.

La quantité relative d'eau sous forme vapeur contenue dans l'air ambiant définit l'humidité, mais cette notion admet plusieurs méthodes de détermination. Dans cet article on s'intéresse à l'humidité relative: c'est le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau à la pression de vapeur saturante pour une température ambiante donnée. Cette définition est pertinente parce que l'humidité relative est maximale (100%) si la quantité de vapeur d'eau est telle que sa pression partielle est égale à sa pression saturante: elle se condense partout (ce qui donne une

impression d'air lourd). On voit alors pourquoi, lorsqu'il fait froid et humide, il faut chauffer l'air ambiant pour diminuer l'humidité: la pression de vapeur saturante augmente avec la température et par suite la pression partielle de vapeur lui devient très inférieure et il y a retard de la condensation. A l'inverse, quand il fait chaud et humide, pour combattre l'humidité, on a intérêt à rafraîchir l'air ambiant pourvu de prévoir un moyen de récupérer l'eau condensée: la température diminuant, elle finit par atteindre la température de rosée, l'eau se condense débarrassant ainsi l'air de cet excédent; mais à condition que le système récupère cette eau en un endroit fixe. C'est pourquoi il faut faire circuler l'air ambiant dans un appareil où il se débarrasse de son eau: c'est un des principes des climatiseurs, le refroidissement étant obtenu par échange thermique avec l'extérieur chaud selon les principes de la pompe à chaleur.

Une expérience toute simple, imaginée la première fois par Le Roy (1752), permet d'évaluer la température du point de rosée de la vapeur d'eau. Cette température renseigne sur la pression partielle de vapeur d'eau, et par conséquent sur l'humidité relative, la pression de vapeur saturante étant donnée par des tables en fonction de la température ambiante. L'expérience consiste à refroidir un récipient rempli d'eau en y ajoutant successivement des morceaux de glace jusqu'à observer la condensation sur la paroi externe de la vapeur d'eau contenue dans l'air ambiant. Un thermomètre plongé dans l'eau permet de relever la température correspondante qui est la température de rosée. Il faut utiliser un récipient assez bon conducteur de la chaleur pour que la température de la paroi externe soit à peu près celle de l'eau. A partir d'une eau à 17°C j'ai obtenu une température du point de rosée de 5°C. On peut en déduire l'humidité relative puisque cette température est telle que la pression de vapeur est égale à celle de la vapeur saturante, et on sait par les tables que pour 5°C elle vaut 871 Pa. L'humidité relative est, comme on le verra ci-après, le rapport, exprimé en pourcentage, de la pression de vapeur à la pression de vapeur saturante à la température ambiante 17°C; les tables donnant pour elle 1938 Pa, on a comme humidité relative: $871/1938 \times 100$ soit 45%, ce qui est très sec !



2 - Principe de la mesure et résultats attendus

A la place de l'expérience précédente on peut mettre en œuvre le principe du psychromètre, c'est-à-dire déterminer l'humidité relative au moyen d'un dispositif d'évaporation, comme indiqué ci-après.

2-1 - Théorie

Soit de l'air humide de volume V , à la température T , de masse m telle que

$$m = m_a + m_v$$

avec m_a masse d'air sec, m_v masse de vapeur d'eau. On définit le rapport de mélange ou humidité absolue:

$$r = m_v / m_a$$

La pression de vapeur saturante à une température T , $P_s(T)$ est la pression de vapeur à l'équilibre avec l'eau liquide, au-delà de laquelle il y a condensation. Elle est donnée par les lois de Dupré ou de Duperray:

• Loi de Duperray:

$$P_s = (t/100)^4$$

avec t température en °C, formule valable sur des plages $100^\circ\text{C} < t < 200^\circ\text{C}$

• Loi de Dupré, de la forme

$$\ln P_s = a - b/T - c \ln T$$

où T température absolue en kelvin, valable au-dessous de 100°C (373 K)

Mais on ne va pas utiliser ces lois, on va utiliser une loi polynomiale approchée (voir plus bas). La pression partielle de vapeur est notée P_v . Si P_a est la pression partielle de l'air sec et P la pression totale de l'air humide, on a: $P_v + P_a = P$.

Humidité relative à la température T :

$$u(T) = P_v(T) / P_s(T) \times 100$$

La température de rosée T_d est telle que la pression de vapeur est égale à la pression de vapeur saturante: $P_v = P_s(T_d)$, et l'humidité relative est maximale: $u = 100\%$ pour $T = T_d$.

La température humide T_h est la température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air, la chaleur de vaporisation étant prélevée sur l'air : L_v (kJ/kg)

L'enthalpie spécifique (enthalpie par unité de masse d'air sec) est la chaleur contenue dans l'air humide i (kJ/kg).

Lorsque l'air humide, contenant une masse d'air sec m_a , change d'un état (A) défini par (T_A, r_A) à un état B (T_B, r_B) cette transformation consomme l'énergie :

$$\Delta H = (i_B - i_A)m_a$$

or l'enthalpie spécifique est la somme de la quantité de chaleur à pression constante de l'air sec et de la chaleur de vaporisation spécifiques:

$$i(T,r) = C_{pa} T + rL_v$$

avec $L_v = L_0 + C_{pv} T$;

C_{pa} : chaleur massique de l'air sec à pression constante = 1,006 kJ/kg °C

C_{pv} : chaleur massique de la vapeur d'eau à pression constante = 1,84 kJ/kg °C

L_0 : chaleur latente de vaporisation à $T_0 = 0^\circ\text{C}$, i.e 2501,6 kJ/kg

On a l'humidité absolue:

$$r = \delta P_v / (P - P_v) \text{ avec } \delta = M_v / M_a = 0,622$$

M_v , M_a masses molaires de l'air sec et de la vapeur d'eau.

La relation entre la pression de vapeur et la température humide est:

$$P_v = P_s(T_h) - A.P(T - T_h) \text{ avec } A = C_{pa} / \delta L T_h (P - P_s(T_h)) / P \quad (1)$$

$$A \cong 0,00064 \text{ pour } T_h = 20^\circ\text{C}$$

2-2 - Approximation de la loi de la pression de vapeur saturante pour $0 < T < 40^\circ\text{C}$

On cherche une approximation de la forme :

$$P_s(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4$$

Il faut donc cinq couples de valeurs (T , $P_s(T)$) dans le tableau pour déterminer a , b , c , d , e , répartis entre 0°C et 40°C de manière régulière. On choisit :

$$T = 0^\circ\text{C} \quad P_s = 611,213 \text{ Pa}$$

$$T = 10^\circ\text{C} \quad P_s = 1227,94 \text{ Pa}$$

$$T = 20^\circ\text{C} \quad P_s = 2338,54 \text{ Pa}$$

$$T = 30^\circ\text{C} \quad P_s = 4245,20 \text{ Pa}$$

$$T = 40^\circ\text{C} \quad P_s = 7381,27 \text{ Pa}$$

La résolution des cinq équations linéaires à cinq inconnues donne, tout calcul fait :

$$a = 611,213$$

$$b = 43,53$$

$$c = 1,598$$

$$d = 0,0159$$

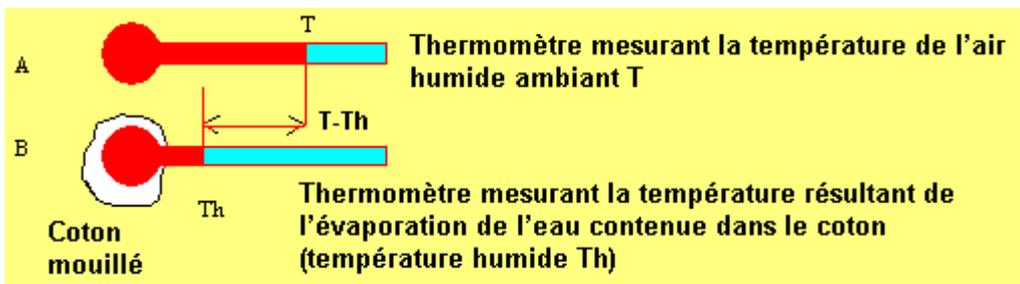
$$e = 0,000567$$

d'où la loi approchée de la pression saturante:

$$P_s(T) = 611,213 + 43,53 T + 1,598 T^2 + 0,0159 T^3 + 0,000567 T^4 \quad (2)$$

3 - Dispositif et mise en œuvre

Pour déterminer la température humide qui intervient dans la relation (1) on prend deux thermomètres (voir figure): l'un d'eux (A) indique la température ambiante T , l'autre (B) est entouré d'un coton imbibé d'eau: en s'évaporant l'eau absorbe la chaleur et la température descend pour se stabiliser à T_h (température humide). Une fois celle-ci connue on peut calculer la pression de vapeur P_v et en déduire l'humidité relative.



3-1 - Mode opératoire

Le mode opératoire est alors le suivant:

- 1 – Relever T avec A et la pression P avec un baromètre
- 2 – Humidifier le coton de B
- 3 – Laisser évaporer en B et attendre l'équilibre thermique
- 4 – Relever T_h en B et $\Delta T = T - T_h$
- 5 – Repérer $P_s(T_h)$ et $P_s(T)$ dans le tableau de la pression saturante, ou le calculer par la formule analytique (2)
- 6 – En déduire P_v :

$$P_v = P_s(T_h) - 0,00064 P \Delta T$$

- 7 – Déterminer r et u:

$$r = 0,622 P_v / (P - P_v)$$

$$u = 100 P_v / P_s(T)$$

3-2 - Exemple de mesure

$T = 28^\circ\text{C}$; $T_h = 23^\circ\text{C}$ équilibre au bout de 15mn; $P = 101324,09 \text{ Pa}$

D'après la table : $P_s(T_h) = 2810,06 \text{ Pa}$

$\Delta T = T - T_h = 5^\circ\text{C}$

$P_v = 2810,06 - 0,00064 \times 101324,09 \times 5 = 2485,82 \text{ Pa}$

Humidité absolue : $r = 0,622 \times 2485,82 / (101324,09 - 2485,82) = 0,0156$

D'après la table : $P_s(T) = 3781,54 \text{ Pa}$

Humidité relative $u = 2485,82 / 3781,54 \times 100 = 88,5\%$

4 - Faites le calcul vous-même

Les formules ci-dessus sont rassemblées dans une feuille excel qui permettra de déterminer r et u si vous entrez les données P, T et T_h relevées lors de votre mesure

[déterminer l'humidité absolue et l'humidité relative](#)

5 - La pomme de pin indique aussi l'humidité!...

Observez les pommes de pin tombées au sol: vous remarquerez que par temps humide elles sont presque fermées, et que par temps sec et ensoleillé, elles s'ouvrent. C'est ce que montrent les deux photos suivantes:



Tôt le matin, il faisait humide dehors: cette pomme de pin était presque refermée



Vers midi, il fait chaud et sec, le soleil brille: cette même pomme de pin, au même endroit sur le rebord de la terrasse, s'ouvre

Le constat se reproduit par une expérience très simple:

- Dans un premier temps, la pomme de pin est maintenue dans une atmosphère humide. Celle-ci est produite par la vapeur qui se dégage d'une casserole contenant de l'eau bouillante: la pomme de pin, tenue avec une pince au-dessus d'elle (mais suffisamment éloignée pour que la chaleur ne perturbe pas l'expérience, dans une zone où la vapeur commence à condenser car plus froide) est presque fermée.
- Dans un deuxième temps, cette même pomme de pin est soumise au courant d'air chaud et sec d'un sèche-cheveux: on constate qu'elle s'ouvre, car débarrassée de son humidité.

Bibliographie

Frédéric Élie : articles « [dissolution et solubilité](#) » et « [états de l'eau](#) »